

ДААННЫЕ GAIA DR2: ОСОБЕННОСТИ, ОГРАНИЧЕНИЯ И СПОСОБЫ ДОСТУПА

Д. А. Ковалева

Институт астрономии Российской академии наук

25 апреля 2018 г. был обнародован второй релиз данных КА Gaia, включающий пятипараметрические астрометрические решения для 1.3 млрд звезд. Обсуждаются содержание релиза данных Gaia DR 2, характеристики астрометрических и фотометрических решений, а также возможности доступа к данным Gaia с использованием инструментов виртуальной обсерватории.

GAIA DR2 DATA: CHARACTERISTICS, LIMITATIONS, ACCESS

D. A. Kovaleva

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

On April 25, 2018, the second data release of Gaia space mission has been published. It includes, among other data, five parameter astrometric solutions for 1.3 billions of stars. We discuss the content of this data release, specific characteristics of astrometric and photometric solutions, as well as methods of accessing Gaia DR2 data using Virtual observatory tools.

Введение

25 апреля 2018 г. был опубликован второй релиз данных астрометрической космической миссии Gaia [1]. Это первый, условно говоря, «настоящий» релиз данных Gaia — в отличие от первого (2016), в котором для вычисления астрометрических параметров частично использовались данные каталогов Hipparcos и Tycho-2 [2]. Gaia DR2 содержит основной каталог данных, включающий пятипараметрические астрометрические решения (координаты, собственные движения и параллаксы) для 1 330 млн звезд, только двухпараметрические решения (координаты) для 360 млн звезд, видимые величины в одной фотометрической полосе Gaia G для 1 690 млн звезд, причем для большей части этих звезд (1 380 млн) измерены также величины в

красной и голубой полосах G_{BP} , G_{RP} . Кроме того, для 7.2 млн звезд измерены лучевые скорости и для 77—161 млн звезд сделаны оценки таких астрофизических параметров, как эффективная температура, светимость, радиус, величина межзвездного поглощения.

Массив астрометрических (и, в ряде отношений, фотометрических) данных Gaia является беспрецедентным по объему и по точности. Именно высокая точность определения параметров Gaia выявляет проблемы и систематические эффекты, которые для менее точных данных замывались шумом случайных ошибок. Кроме того, коллектив Gaia предоставляет пользователю не только обработанные данные, но и большое число технических характеристик параметров их обработки, что позволяет, по замыслу авторов, астроному при обращении к этим данным делать сознательный выбор в отношении требуемых параметров своей выборки [3]. Помимо основного каталога Gaia DR2 содержит дополнительные таблицы, посвященные переменным объектам некоторых типов (например, долгопериодическим переменным, цефеидам, звездам типа RR Lyr), объектам Солнечной системы, кросс-идентификации и др. Объем данных в целом превышает 550 терабайт. Объем основного каталога составляет 2 терабайта. В этом случае эффективным способом обращения к данным представляется создание выборок с использованием предоставляемых архивами Gaia инструментов.

Gaia DR1, DR2 и последующие релизы данных

Важно знать, что релизы данных Gaia DR1, DR2 (и последующие релизы данных) являются полностью независимыми результатами обработки массивов данных, полученных миссией Gaia на протяжении различных промежутков времени ее функционирования. При этом промежуток времени, покрытый каждым последующим релизом данных, включает предыдущие интервалы (DR1 — наблюдения с 25.07.2014 по 16.09.2015, т. е. первые 14 месяцев работы Gaia, DR2 — с 25.07.2014 по 23.05.2016, т. е. первые 22 месяца работы Gaia). Таким образом, из общих соображений, можно ожидать, что данные каждого последующего релиза данных точнее данных предыдущего. Однако, поскольку для получения пятипараметрического астрометрического решения данных первого релиза было недостаточно, в силу небольшого временного интервала, покрытого им, для 2 млн звезд каталога TGAS собственные движения и параллаксы были определены с использованием данных каталогов

Hipparcos и Tycho-2. При этом параллаксы, переопределенные в DR2 для звезд TGAS, как по номинальной, так и по фактической точности лучше параллаксов DR1. О собственных движениях этого сказать пока нельзя, и собственные движения TGAS, в случае расхождений с DR2, следует, по-видимому, предпочесть (см., например, <http://gaia.ari.uni-heidelberg.de/gaia-workshop-2018/files/Gaia-DR2-warnings-caveats-GaiaUserWorkshop.pptx>). Кроме того, для объектов, имеющих особенности, параметры, определенные в DR1, могут оказываться более точными, чем в DR2 (см., например, ниже о казусе RR Lyr).

Кроме того, координаты релиза данных DR2 относятся к иной эпохе (J2015.5), чем координаты DR1 (J2015.0), что может быть значимо для самых быстродвижущихся объектов. Внутренние многозначные идентификаторы Gaia, присваиваемые каждому объекту в каждом релизе, не наследуются, а изменяются (и будут изменяться) от релиза к релизу данных вплоть до финального, ожидаемого после 2022 г. То же относится и к фотометрической системе: ее калибровки были пересчитаны для релиза данных 2 относительно DR1 и будут уточняться в дальнейшем, поэтому фотометрическая величина G_{DR1} систематически отличается от фотометрической величины G_{DR2} . Именно высокая точность данных делает значимыми эти различия между параметрами, определенными в DR2, относительно DR1.

О полноте Gaia DR2

Степень полноты данных второго релиза существенно выше, чем в DR1, однако все еще несовершенна. В основном DR2 полон для диапазона звездных величин $13^m \leq G \leq 17^m$. Однако количество параметров, определенных даже для этого диапазона звездных величин, зависит от расположения звезды на небесной сфере. Распределение звезд DR2 по небу носит видимые следы закона сканирования КА Gaia. Пятипараметрические астрометрические решения вычисляются только для звезд, попавших в поле зрения аппарата не менее определенного числа раз, причем группы наблюдений должны быть разделены достаточными промежутками времени (эти группы наблюдений называются “visibility periods”, каждый из них может содержать до десятков наблюдений; пятипараметрические астрометрические решения опубликованы только для звезд, для которых количество visibility periods не меньше шести). Предполагается,

что к окончанию расчетного срока функционирования проекта Gaia (июль 2019 г.) вся небесная сфера должна быть покрыта наблюдениями с количеством visibility periods не меньше шести. По состоянию на май 2016 г., когда был завершен сбор данных, обработанных в рамках DR2, на небесной сфере есть участки, не покрытые достаточным количеством наблюдательных периодов, и поэтому пятипараметрические астрометрические решения имеют области неполноты по распределению по координатам. Для ярких объектов $G \leq 3^m$ данные в DR2 отсутствуют, а звезды в диапазоне звездных величин $3^m \leq G \leq 7^m$ представлены с существенной неполнотой. Предельная звездная величина снижается в плотных звездных полях с $G \approx 21^m$ до $G \approx 18^m$. Имеются потери (порядка 20 %) среди звезд с высоким собственным движением и звезд, расположенных вблизи ярких объектов.

Систематические эффекты

Астрометрические данные

Точность определения астрометрических параметров для звезды систематически зависит от ее блеска и цвета. В связи с этим качество астрометрического решения связано с качеством фотометрического решения. Имеются мелкомасштабные корреляции ошибок, связанные с законом сканирования КА. Сравнение с параллаксами квазаров показало наличие систематического сдвига нуля-пункта параллаксов порядка -0.029 mas [3]; однако этот сдвиг зависит от положения объекта на небесной сфере и, по-видимому, от типа объекта (в частности, его фотометрических характеристик). Так, для цефеид значение сдвига нуля-пункта определено равным -0.046 mas [4], а для звезд ветви красных гигантов -0.050 mas [5]. Наличие систематических эффектов, не исчезающих при усреднении, приводит к тому, что фактическая ошибка среднего для значений, усредненных по группе объектов, не может быть значимо меньше ошибки для отдельного объекта.

Фотометрические данные

Значения ошибок определения фотометрических величин систематически зависят от фотометрической величины и цвета звезды, причем эта зависимость, в силу свойств методов усреднения, не является гладкой. Имеется систематическая зависимость определения

фотометрических характеристик от времени, что не влияет значительно на усредненные данные в основном каталоге DR2, но может быть важно для кривых блеска переменных объектов [6, 7].

Двойные и переменные объекты

В DR2 отсутствует ранее запланированный каталог неодионых (двойных и кратных) звезд, и, в зависимости от углового разделения и блеска, компоненты двойных систем интерпретируются либо как две, либо как одна звезда (см., например, [8]). Возможное орбитальное движение в этом случае систематически ухудшает качество как астрометрического, так и фотометрического решения. Для переменных объектов качество определения астрометрических и фотометрических параметров также может быть сомнительным, вплоть до одиозного (отмеченного самой командой Gaia) случая с RR Lyr (в Gaia DR2 $G = 17.04^m$ и параллакс $-2.61 \pm 0.61 \text{ mas}$ при действительном максимальном блеске $V = 7.06^m$ и амплитуде переменности до 0.6^m [9] и параллаксе Gaia DR1 TGAS $3.64 \pm 0.23 \text{ mas}$).

Флаги и индикаторы качества решения

Помимо определенных в рамках DR2 значений параметров звезд и их ошибок основной каталог содержит также значительное количество параметров, характеризующих качество и различные свойства астрометрического и фотометрического решения для каждого из объектов. При создании собственной выборки с определенными свойствами можно руководствоваться информацией об этих параметрах (см., например, описание модели данных Gaia DR2 https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/Gaia_archive/chap_datamodel/) или использовать фильтры, предложенные в работе Линдегрена и др. [3]. При этом следует иметь в виду, что применение любого фильтра по качеству определения того или иного параметра вносит определенного рода систематические искажения в выборку (например, фильтр по величине относительной ошибки параллакса заведомо уменьшает в выборке долю далеких звезд).

Астрофизические параметры

В отличие от астрометрических и фотометрических параметров звезд, определенных в Gaia DR2 с не достигавшейся ранее точностью и полнотой, к астрофизическим параметрам, опубликованным в основном каталоге, следует относиться не более как к приблизительным оценкам. Отметим, в частности, что оценки эффективной температуры сделаны в предположении отсутствия межзвездного поглощения, что, таким образом, означает их полную неадекватность для объектов, находящихся в зонах с высоким межзвездным поглощением. Межзвездное поглощение оценивается по соотношению величин в предположении стандартного закона поглощения с использованием значения параллакса; затем вычисляется светимость, а по светимости и эффективной температуре оценивается радиус звезды [10].

Отметим, что переход от параллакса к расстоянию в общем случае не является тривиальным. Оценка расстояния до объекта как величины, обратной его параллаксу, строго верна только при условии отсутствия ошибки параллакса. При ненулевой же наблюдательной ошибке параллакса (т. е. в любой ситуации реальных измерений) соответствующая ошибка расстояния до объекта несимметрична. Этой асимметрией можно с достаточным основанием пренебречь при относительных ошибках параллаксов до $\approx 10\%$. При относительной ошибке параллакса примерно от 10 до 20 % использование величины, обратной параллаксу, для оценки расстояния ведет к значимому систематическому занижению таких оценок (эффект Лутца—Келкера). Для отрицательных значений параллакса, как и для значений, определенных с большими ошибками, использование в качестве расстояния величины, обратной значению параллакса, некорректно. Подробный обзор этой проблемы см. в [11]. В ряде задач выход может быть найден в использовании байесовских методов для вычисления расстояния по параллаксу с учетом предварительных соображений о распределении звезд в рассматриваемом ансамбле. В частности, для всех объектов Gaia DR2 с известными параллаксами были сделаны такие оценки в работе [12]. Соответствующий каталог [13] является сопроводительным к архиву данных Gaia и в некоторых случаях размещается вместе с ним.

Возможности доступа к данным Gaia DR2

Данные Gaia DR2 размещены в виде архива и доступны на портале ESA <http://gea.esac.esa.int/archive/>, а также в партнерских центрах данных в Centre de Donnees astronomiques de Strasbourg (CDS), ASI Space Science Data Center (SSDC), Astronomisches Rechen-Institut (ARI) и Institut fur Astrophysik Potsdam (AIP).

Запросы к архиву Gaia организуются в соответствии со стандартами Виртуальной обсерватории с использованием языка ADQL (Astronomical Data Query Language) <http://www.ivoa.net/documents/REC/ADQL/ADQL-20081030.pdf> и протокола обращения TAP (Table Access Protocol) <http://www.ivoa.net/documents/TAP/20180830/PR-TAP-1.1-20180830.pdf>. Запросы на ADQL могут быть адресованы к архиву Gaia как через специализированные веб-интерфейсы центров данных, так и с помощью клиентов (Topcat <http://www.starlink.ac.uk/topcat/>, STILTS <http://www.starlink.ac.uk/stilts/>, Java и Python TAP-клиенты).

В ходе тьюториала будут продемонстрированы некоторые возможности взаимодействия с архивом данных Gaia, слушатели смогут протестировать типовые варианты запросов.

Заключение

Качество и объем астрометрических и фотометрических данных Gaia DR2 задают высокие требования к пониманию свойств полученных данных для их эффективного использования. Вплоть до выхода очередного, третьего, релиза в 2021 г. данные DR2 будут основным источником однородной и высокоточной астрометрической, фотометрической информации и информации о лучевых скоростях звезд, широко используемых в мировой астрономии. Кроме того, доступ к данным DR3 и финального релиза данных Gaia будет организован с использованием тех же принципов, что повышает значимость освоения инструментов доступа к архиву Gaia DR2 сегодня.

Все работы, использующие данные Gaia, должны сопровождаться следующей благодарностью: “This work has made use of data from the European Space Agency (ESA) mission *Gaia* (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), processed by the *Gaia* Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Funding for the DPAC has been provided by national institutions, in particular the institutions participating in the *Gaia* Multilateral Agreement”.

Библиографические ссылки

1. *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A1. 1804.09365.
2. *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 595. — P. A2. 1609.04172.
3. *Lindegren L., Hernández J., Bombrun A. et al.* Gaia Data Release 2. The astrometric solution // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A2. 1804.09366.
4. *Riess A. G., Casertano S., Yuan W. et al.* Milky Way Cepheid Standards for Measuring Cosmic Distances and Application to Gaia DR2: Implications for the Hubble Constant // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 861. — P. 126. 1804.10655.
5. *Zinn J. C., Pinsonneault M. H., Huber D., Stello D.* Confirmation of the zero-point offset in Gaia Data Release 2 parallaxes using asteroseismology and APOGEE spectroscopy in the Kepler field // *ArXiv e-prints.* — 2018. 1805.02650.
6. *Riello M., De Angeli F., Evans D. W. et al.* Gaia Data Release 2. Processing of the photometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A3. 1804.09367.
7. *Evans D. W., Riello M., De Angeli F. et al.* Gaia Data Release 2. Photometric content and validation // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A4. 1804.09368.
8. *Ziegler C., Law N. M., Baranec C. et al.* Measuring the Recoverability of Close Binaries in Gaia DR2 with the Robo-AO Kepler Survey // *ArXiv e-prints.* — 2018. 1806.10142.
9. *Samus' N. N., Kazarovets E. V., Durevich O. V. et al.* General catalogue of variable stars: Version GCVS 5.1 // *Astronomy Reports.* — 2017. — Vol. 61. — P. 80–88.
10. *Andrae R., Fouesneau M., Creevey O. et al.* Gaia Data Release 2. First stellar parameters from Apsis // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A8. 1804.09374.
11. *Bailer-Jones C. A. L.* Estimating Distances from Parallaxes // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2015. — Vol. 127. — P. 994. 1507.02105.
12. *Luri X., Brown A. G. A., Sarro L. M. et al.* Gaia Data Release 2. Using Gaia parallaxes // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A9. 1804.09376.

13. *Bailer-Jones C. A. L., Rybizki J., Fouesneau M. et al.* Estimating Distance from Parallaxes. IV. Distances to 1.33 Billion Stars in Gaia Data Release 2 // *Astron. J.* — 2018. — Vol. 156. — P. 58. 1804.10121.